

*Вавилов А.А.,  
студент, 2 курс, Приборостроительный факультет  
Кафедра «Радиотехника»  
ИжГТУ имени М.Т. Калашникова  
Ижевск, Россия*

## **ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В СИСТЕМАХ С КОМБИНИРОВАННЫМИ КАНАЛАМИ СВЯЗИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА**

***Аннотация:** Рассматривается интеграция волоконно-оптической подсистемы и беспроводных подсистем в производственном комплексе. Даются расчётные соотношения для пропускной способности, оптического бюджета и суммарной задержки. Приводится текстовое описание схемы связи «ВОЛС → беспроводные сети (локальная и сотовая пятого поколения)». Применимость комбинированных каналов подтверждается результатами отечественных работ, где показано резервирование и повышение доступности при неблагоприятных условиях распространения.*

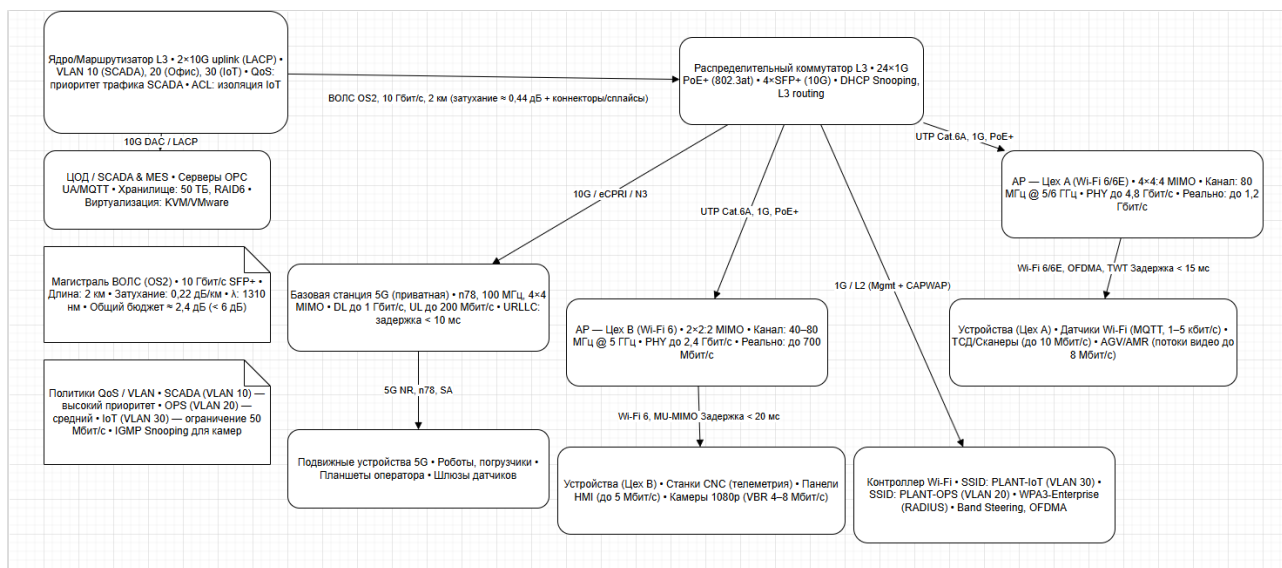
***Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия, атмосферная оптическая связь, радиоканал, комбинированная система, пропускная способность, задержка, оптический бюджет, производственный комплекс.*

***Annotation:** The paper considers the integration of a fiber-optic subsystem and wireless subsystems within an industrial complex. Calculation relations are provided for throughput, optical power budget, and total latency. A textual description of the communication scheme "FOCL → wireless networks (local and fifth-generation cellular)" is presented. The applicability of combined channels is confirmed by the results of domestic studies, which demonstrate redundancy and improved availability under unfavorable propagation conditions.*

**Key words:** *fiber-optic line, free-space optical communication, radio channel, combined system, throughput, latency, optical power budget, industrial complex.*

Комбинированные каналы связи строятся как совокупность волоконно-оптического участка магистрали и одного или нескольких беспроводных участков доступа и/или резервирования. В практической архитектуре производственного комплекса ядро на базе маршрутизатора третьего уровня и вычислительный кластер систем управления и производственного исполнения соединяются с распределительным коммутатором по волокну; далее трафик поступает к контроллеру беспроводной сети и точкам доступа, а также к базовой станции частной сотовой сети пятого поколения. На стороне потребителей находятся терминалы учёта, датчики, панели управления, мобильные роботы и транспорт. Такая конфигурация обеспечивает жёсткое зонирование по логическим сетям и приоритетам технологического трафика, а также отказоустойчивость за счёт радиорезерва.

На рисунке 1 показаны ядро/маршрутизатор третьего уровня с агрегированными подъёмами 10 Гбит/с; вычислительный кластер систем управления и производственного исполнения; магистральная волоконно-оптическая линия длиной 2 км с удельным затуханием около 0,22 дБ/км; распределительный коммутатор с восходящими портами 10 Гбит/с; контроллер беспроводной сети с профилями технологических и эксплуатационных служб; точки доступа в цехах с реальной полезной скоростью до единиц гигабит в секунду; базовая станция частной сотовой сети пятого поколения для подвижных абонентов; группы устройств цехов (датчики, терминалы сбора данных, панели, камеры, мобильные роботы).



**Рисунок 1. Структурная схема передачи данных из волоконно-оптической подсистемы в беспроводные сети производственного комплекса**

Технологический мост «ВОЛС → радио» распространён в подходах типа передачи радиосигналов по оптическому волокну. Характер обобщённой цепочки чётко описан в профильной литературе: «На центральной станции оптическая несущая модулируется на поднесущих СВЧ-диапазона цифровыми сигналами и передается по волоконно-оптической линии на базовые станции» [1]. В классических гибридных системах радио- и лазерной связи разработчики используют математические модели, в которых беспроводной резерв работает параллельно с оптическим каналом. Показано: «адекватной моделью гибридного канала является система массового обслуживания с двумя обслуживающими приборами, обладающими разными скоростями обслуживания» [3]. Это согласуется с практикой промышленного доступа, где радиоканал включают только при ухудшении состояния основного канала.

В современных исследованиях для промышленных объектов дополнительно рассматривается использование атмосферной оптической связи как части гибридной линии. В работах по прикладным сценариям прямо отмечено: «Предложена концепция реализации гибридных линий связи на промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации,

базирующихся на применении атмосферной оптической связи» [4]. Смысл такого включения в производственной сети один – дать высокоскоростной канал с естественной пространственной изоляцией, не требующей лицензирования частот, и получить резервирование на радиосегменте там, где климатические факторы снижают прозрачность атмосферы.

Отдельное направление – комбинирование существующих технологических сетей управления и диагностики энергетических и промышленных установок. В профильной статье подчёркивается значимость отрасли («Энергетика – важнейшая отрасль экономики») [2]. Там же показано, что объединение каналов сбора технологической информации и передачи диагностических данных позволяет использовать уже развёрнутую волоконно-оптическую инфраструктуру цехов и подстанций, сократив капитальные и эксплуатационные затраты без ухудшения своевременности контроля.

Резервирование на радиосегменте задаёт простое правило переключения по состоянию. В моделях гибридных многоскачковых систем подчёркивается: «В качестве резервного используется радиоканал, задействуемый при снижении отношения сигнал/шум ниже заданного порога во всех оптических каналах» [5]. Это правило применимо и в цеховой сети, где пылевые и паровые выбросы, а также вибрации и перекрытия могут ухудшать оптический тракт локальных беспроводных мостов и влиять на приём на точках доступа.

Верхняя оценка пропускной способности комбинированного канала задаётся емкостной формулой для участка, лимитирующего сквозную скорость. Для радиодоступа используем выражение в логарифмической форме, записанное русскими обозначениями:

$$P_{\text{рад}} = \Delta f \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{C}{\text{Ш}} \right)$$

где  $\Delta f$  – полоса,  $C/\text{Ш}$  – отношение средней мощности сигнала к мощности шума. Для оптического герметичного тракта магистрали

ограничением чаще является аппаратура, поэтому сквозная пропускная способность определяется минимумом:

$$P_{\text{скв}} = \min(P_{\text{маг}}, P_{\text{радио}}, P_{\text{комм}})$$

где  $P_{\text{маг}}$  – пропускная способность волоконно-оптической подсистемы,  $P_{\text{радио}}$  – пропускная способность беспроводной подсистемы,  $P_{\text{комм}}$  – пропускная способность узлов коммутации на пути. В производственном примере при магистрали 10 Гбит/с и беспроводном доступе с эффективной полезной долей  $\eta$  от физической скорости  $V_{\text{физ}}$  имеем оценку  $P_{\text{радио}} = \eta \cdot V_{\text{физ}}$ . При  $\eta$  в пределах 0,4–0,6 для современных цеховых точек доступа и целевой физической скорости 2,4 Гбит/с полезная скорость составит около 1–1,4 Гбит/с; следовательно, лимит сквозной скорости задаст беспроводной сегмент.

Оптический бюджет магистрали определяет устойчивость участка «ядро – распределение». В русских обозначениях используем сумму потерь и запас:

$$B_{\text{опт}} = a \cdot L + \sum E_{\text{муфт}} + \sum E_{\text{соед}} + P_{\text{зап}}$$

где  $a$  – удельное затухание кабеля,  $L$  – длина,  $\sum E_{\text{муфт}}$  и  $\sum E_{\text{соед}}$  – суммарные потери на муфтах и коннекторах,  $P_{\text{зап}}$  – требуемый запас по мощности. Для одномодового волокна типа OS<sub>2</sub> при  $\alpha \approx 0,22$  дБ/км и  $L = 2$  км получаем основной вклад  $\sim 0,44$  дБ; даже с коннекторами и сплайсами бюджет остаётся в пределах типичных запасов при использовании приёмопередатчиков на 10 Гбит/с. Это позволяет без усиления довести поток от ядра до распределительного коммутатора и далее к контроллеру беспроводной сети.

Суммарная задержка комбинированного канала складывается из задержки в оптическом тракте, в сетевом оборудовании и в эфире:

$$\tau_{\text{сум}} = \tau_{\text{опт}} + \tau_{\text{узл}} + \tau_{\text{эфир}}$$

Оценим каждое слагаемое. Задержка в волокне  $\tau_{\text{опт}} \approx L \cdot n/c$ , где  $n$  – показатель преломления,  $c$  – скорость света; для  $L = 2$  км и  $n \approx 1,468$  получаем  $\sim 9,8$  мкс. Задержка в узлах определяется глубиной очереди и режимами

планирования; её уменьшают строгой приоритизацией технологического трафика и ограничением неблокирующих очередей для видеопотоков. Задержка в эфире зависит от выбранной технологии и нагрузки; при радиодоступе с полосой 80 МГц и применением многостанционного доступа с ортогональным частотно-временным разделением реальная задержка укладывается в десятки миллисекунд для телеметрии и сканеров, а для транспорта и управлений применяют профили с укороченными кадрами и предсказуемой служебной надстройкой. В частной сети пятого поколения профили критических сервисов обеспечивают задержки менее 10 мс при достаточной плотности покрытия и качественной синхронизации.

Помехоустойчивость комбинированного канала определяется слабейшим участком. Для беспроводного плеча целесообразно задать порог переключения по оценке отношения сигнал/шум на приёмнике: если ОСШ падает ниже порогового значения для заданной модуляции и целевого уровня ошибок, трафик переводится на резервное плечо. Такое правило согласуется с результатами моделирования гибридных радиооптических систем [5]. Для оптического плеча критичны внештатные изгибы, загрязнения коннекторов и перегибы патч-кордов, что требует регламентов профилактики и контроля отражений.

Практический пример производственного комплекса. На основании разработанной схемы «ядро – ЦОД – распределение – контроллер – точки доступа – устройства» реализуем три виртуальные локальные сети: технологическую, эксплуатационную и датчиковую. Политики обслуживания очередей задают высокий приоритет трафику систем управления. Для видеонаблюдения включается групповой контроль подписки по многоадресным потокам, чтобы централизованный коммутатор не размножал видеотрафик в технологический сегмент. Частная сеть пятого поколения используется для подвижных роботов и цехового транспорта, где требуется непрерывный сервис при перемещении. В качестве альтернативы/резерва для

межцеховых переемычек допустимо включать атмосферные оптические мосты; исследования по промышленным объектам показывают их эффективность при корректном учёте климатических факторов [4].

#### Список литературы:

1. Арбузова, Е. Ю. Передача сигнала «Radio-over-Fiber» по ВОЛП в режиме плотного управления дисперсией / Е. Ю. Арбузова, К. А. Волкова, К. А. Волков, М. В. Дашков, О. Е. Кокурина // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – Т. 10, № 4. – С. 19–23
2. Васев, А. Н. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок / А. Н. Васев, Р. Ш. Мисбахов, А. И. Зиганшина, В. В. Федотов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 11–12. – С. 16–26
3. Вишневский, В. М. Моделирование и анализ гибридного канала связи на базе лазерной и радио технологий / В. М. Вишневский, О. В. Семенова, С. Ю. Шаров // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 35. – С. 237–249
4. Казанцев, С. Ю. Перспективы применения атмосферной оптической связи на крупных промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации / С. Ю. Казанцев и др. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19, № 1. – С. 21–30
5. Краснов, Р. П. Гибридная многоскачковая система атмосферной оптической связи с пространственным разнесением / Р. П. Краснов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 98–104